

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СЕРЕДА ОЛЕКСАНДР ГРИГОРІЙОВИЧ

УДК 621.316.573:621.3.064.23:621.316.925.1:621.316.91

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В
СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ДІАГНОСТИКИ, КОНТРОЛЮ ТА
ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

Спеціальність: 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
Галузь знань: 14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

*Ідентифікований як змістовий
з керування приладом
дисертації досліджую
вчений секретар спе-
ціальної комісії з
64.050.02
Віталій В. Шах*

О. Г. Середя

Науковий консультант
Шевченко Сергій Юрійович
доктор технічних наук, професор



16.02.2021р

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Середа О.Г. Теоретичні основи розвитку цифрових технологій в системах автоматизації, діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертацію присвячено розвитку теорії електромагнітних перехідних процесів в електротехнічних комплексах і системах низької напруги при несиметричних режимах роботи розподільних мереж електропостачання, а саме розробці теоретично обґрунтованого системного комплексу наукових методів і дослідницьких підходів застосування цифрових технологій для вдосконалення захисних характеристик апаратів релейного захисту та протиаварійної автоматики електричних мереж напругою 0,4 кВ.

Теоретично обґрунтована та доведена доцільність розкладання сигналів, що являють собою складні коливання, на гармонійні складові, шляхом їх дискретизації множенням на ґратчасту дельта-функцію з частотою меншою за подвоєну частоту Найквіста, що дало можливість розширити перелік діагностованих аварійних режимів роботи розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ магістральної конфігурації.

Здобула подальший розвиток теорія цифрової обробки аналогових сигналів шляхом їх множення на ґратчасті дельта-функції з різними інтервалами дискретизації, що дозволило прискорити аналіз гармонійного спектру фазних струмів і струму в нейтральному провіднику за наявності нелінійних спотворень їх синусоїдальної форми внаслідок різної характеристики навантажень.

Теоретично обґрунтована доцільність застосування методів цифрової обробки сигналів отриманих від датчиків струму для формування комплексних критеріїв спрацьовування максимальних струмових захистів при міжфазних коротких замиканнях з метою ідентифікації аварійних режимів роботи

електричної мережі за ступенем спотворень середньоквадратичних значень фазних струмів в перехідному режимі, що дозволило знизити поріг чутливості максимального струмового захисту до рівня струмів віддалених коротких замикань, значення яких менші за пускові струми асинхронних електродвигунів підключених на початку лінії електропередачі.

Встановлено процедури цифрової обробки отриманих від датчиків струму сигналів з метою вилучення інформації про такі параметри електричного кола, як коефіцієнт потужності й гармонійний спектр фазних струмів, виходячи з аналізу спотворених під впливом нелінійних навантажень й аперіодичної складової середньоквадратичних значень, обчислених в перехідному режимі за час, що не перевищує одного періоду зміни фазної електрорушійної сили.

Науково обґрунтована та доведена доцільність формування критерію спрацьовування захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань без залучення гармонійного аналізу спектру несинусоїдального струму, коли цілеспрямоване спотворення середньоквадратичного значення шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності дозволяє не враховувати величину струму третьої гармоніки при побудові захисту від струмів однофазних коротких замикань і враховувати при побудові захисту від струмів перевантаження.

З урахуванням розвитку існуючої методології в галузі теорії цифрової обробки сигналів розроблений комплекс наукових методів та дослідницьких підходів до вирішення актуальної науково-прикладної проблеми вдосконалення захисних характеристик апаратів максимального струмового захисту, а саме:

- методи визначення коефіцієнта потужності електричного кола в перехідному режимі виникнення надструму для формування комплексного критерію ідентифікації виду збурення: струм віддаленого короткого замикання або пусковий струм асинхронного електродвигуна;
- метод аналізу гармонійного складу фазних струмів несинусоїдальної форми для швидкої ідентифікації аварійних режимів роботи розподільних мереж електропостачання за наявності нелінійних навантажень;

- метод ковзного моніторингу величини середньоквадратичного значення струму шляхом застосування математичного апарату інтегрування квадратів його миттєвих значень, отриманих з визначеною частотою дискретизації вихідної аналогової залежності струму в часі, який дозволив: діагностувати порушення цілісності нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженої мережі електропостачання з розподіленням вздовж лінії електропередачі як лінійним, так і нелінійним навантаженням без залучення гармонійного аналізу спектру фазних струмів та сформувані критерії спрацювання пристроїв захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг спричинених обривом нейтрального провідника; вдосконалити алгоритм захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань за рахунок врахування гармонійного спектру струму в нейтральному провіднику, що дозволило в мережах електропостачання з різною характеристикою навантаження враховувати третю гармонійну складову струму вибірково шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності в часі;
- методи діагностування теплового стану асинхронних електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, шляхом безпосереднього контролю над температурою обмоток статора в момент пуску, засновані на аналізі впливу зміни активного опору обмотки статора при зміні її температури на нерівномірність екстремальних значень миттєвої потужності, що споживає електродвигун при пуску;
- метод теплового захисту асинхронних електродвигунів в умовах нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів, який забезпечує зниження порогу чутливості теплового захисту асинхронних електродвигунів при струмах перевантаження за рахунок врахування впливу вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме струму п'ятої гармоніки, яка призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток статора.

Розроблені алгоритми цифрової обробки аналогових сигналів отриманих від датчиків струму для забезпечення функціонування мікроконтролерних блоків керування апаратами релейного захисту та протиаварійної автоматики, а саме:

- алгоритми швидкої ідентифікації виду надструму, зокрема пускових струмів асинхронних електродвигунів, за час, що не перевищує одного періоду зміни фазної електрорушійної сили після виникнення збурення електричного кола, що дозволило знизити поріг чутливості апаратів максимальних струмових захистів до рівня струмів віддалених коротких замикань і забезпечити режим віддаленого резервування відмов захистів;
- алгоритми функціонування мікроконтролерних розчіплювачів автоматичних вимикачів при обриві нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженої мережі з розподіленим вздовж лінії електропередачі навантаженням, в яких за наявності нелінійних навантажень формування критерію спрацьовування захисту здійснюється за рахунок широко використовуваних в пристроях релейного захисту та протиаварійної автоматики математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень фазних струмів без залучення аналізу їх гармонійного складу;
- алгоритм функціонування мікроконтролерних розчіплювачів автоматичних вимикачів при захисті нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань, який базується на ковзному моніторингу середньоквадратичного значення струму в нейтральному провіднику в режимі, коли цілеспрямовано вносяться спотворення в обчислення середньоквадратичного значення струму шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності, що дозволило не враховувати величину струму третьої гармоніки при побудові захисту від однофазних коротких замикань і враховувати при реалізації захисту від перевантажень щоб забезпечити повну селективність захистів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ з глухим заземленням нейтралі як з лінійними, так і з нелінійними навантаженнями без залучення гармонійного аналізу спектра струму в нейтральному провіднику;

- алгоритми діагностування теплового стану асинхронних електродвигунів в перехідному режимі пуску шляхом безпосереднього контролю над температурою обмотки статора за зміною її активного опору при нагріванні, суть якого полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої та квазімиттєвої потужностей, що споживаються в режимі виникнення пускового струму;
- алгоритм функціонування реле теплового захисту асинхронних електродвигунів з урахуванням вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме струму п'ятої гармоніки, яка призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток статора.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та вибраного напрямку досліджень, сформульовано головну мету та завдання роботи, наведено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів.

У першому розділі наведено науково-технічне обґрунтування актуальності проведення досліджень і розробки методів формування оптимальних алгоритмів функціонування мікроконтролерних засобів протиаварійного керування з метою забезпечення стійкості електроенергетичних комплексів і систем.

Також у першому розділі проаналізовані технічні рішення спрямовані на швидке формування критеріїв ідентифікації різних аварійних режимів роботи електричного кола: міжфазних коротких замикань, пусків асинхронних електродвигунів, однофазних коротких замикань на нейтральний провідник, перенапруг у однофазних споживачів електроенергії внаслідок порушення цілісності нейтрального провідника, перевантажень нейтрального провідника струмами третьої гармоніки, діагностування теплового стану асинхронних електродвигунів при перевантаженнях.

У другому розділі розроблені ефективні алгоритми швидкої ідентифікації виду надструму з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань, що дозволило удосконалити захисну часоструміву характеристику мікроконтролерних розчіплювачів автоматичних вимикачів і забезпечити як високу швидкодію селективного захисту, так і режим віддаленого резервування відмов апаратів максимального струмового захисту.

У третьому розділі отримані математичні співвідношення, що дозволяють в мережах електропостачання з нелінійними видами навантажень i , як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми фазних струмів враховувати їх гармонійний склад при побудові високочутливих захистів чотирьохпровідних розгалужених мереж електропостачання з розподіленням вздовж магістральної лінії електропередачі навантаженням в аварійних режимах роботи нейтрального провідника.

У четвертому розділі теоретично обґрунтовано метод діагностування аварійних режимів електричного кола, який полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається в перехідному режимі виникнення струму збурення, а саме розроблені математичні моделі теплового стану електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, при захисті від неприпустимого перевищення температури обмоток шляхом безпосереднього контролю над температурою обмотки статора за збільшенням її активного опору. Запропоновано та реалізовано у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту технічне рішення, яке дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформувати час спрацьовування реле захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

Ключові слова: розподільна мережа електропостачання, релейний захист, максимальний струмовий захист, цифрова обробка сигналів, коефіцієнт потужності, віддалене коротке замикання, віддалене резервування відмов захистів, нелінійні спотворення, гармонійний спектр несинусоїдального сигналу, асинхронний електродвигун, середньоквадратичне значення струму, дискретизація аналогового сигналу, частота дискретизації, інтервал квантування, мікроконтролерний блок керування, автоматичний вимикач, напівпровідниковий розчіплювач.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. Быстродействующая система защиты мощных тиристорных преобразователей на основе токоограничивающих автоматических выключателей / А. Ю. Бару, В. П. Богатырев, Ю. Л. Шинднес, А. Г. Серeda. *Електротехніка і електромеханіка*. 2002. № 2. С. 15-17.
2. Серeda А. Г. Эффективное использование независимых расцепителей токоограничивающих автоматических выключателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 3. С. 56-60.
3. Способность металлокерамических контактов токоограничивающих автоматических выключателей коммутировать предельные токи короткого замыкания / А. Г. Серeda. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 3. С. 45-47.
4. Повышение электрической изоляции межконтактного промежутка в быстродействующем автоматическом выключателе постоянного тока / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2006. № 36. С. 65-68.
5. Расчет поляризованной магнитной цепи выходного реле для полупроводникового расцепителя автоматического выключателя / А. Г. Серeda, Е. В. Фетюхина. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 35-38.
6. Усовершенствованная математическая модель индукционно-динамического привода автоматического выключателя / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2008. № 40. С. 66-83.
7. Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока высокого напряжения / В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, В. В. Литвиненко. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. № 1. С. 25-29.
8. Эффективное использование электродинамических усилий в контактных системах автоматических выключателей / Д. К. Монахов, О. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2009. № 44. С. 87-94.

9. Качественный анализ влияния ферромагнитного сердечника на величину силы индукционно-динамического привода / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2010. № 29. С. 57-64.

10. Экспериментальные исследования блока компенсации переменного магнитного поля для автоматического выключателя / Е. Г. Король, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, Ю. Д. Рудас. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2011. № 4. С. 20-28.

11. Компенсация вектора переменного магнитного момента электрооборудования с помощью электромагнита с составным ферромагнитным сердечником / Е. Г. Король, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, Ю. Д. Рудас. *Технічна електродинаміка.* 2011. № 4. С. 20-25.

12. Тепловий розрахунок струмоведучої частини автоматичного вимикача / В. В. Литвиненко, А. Г. Серeda, Л. С. Козар, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2012. № 28. С. 27-43.

13. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda, Л. Б. Жорняк, В. В. Моргун. *Електротехніка та електроенергетика.* 2012. № 2. С. 66-72.

14. Повышение надежности защиты электрических сетей ОБЛЭНЕРГО 0,4 кВ за счет использования комплексных критериев срабатывания / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda. *Світлотехніка та електроенергетика.* 2012. № 2 (30). С. 42-54.

15. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі / О. С. Кобозев, О. Г. Серeda, В. В. Моргун. *Електротехніка і електромеханіка.* 2012. № 5. С. 21-26.

16. Повышение пожарной безопасности электроустановок собственных нужд напряжением 0,4 кВ атомных электростанций / А. Г. Середя, Н. Г. Фонта, В. В. Моргун, С. А. Березанский. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2012. № 61 (967). С. 8-23.

17. Технічний аналіз сучасних методів покращення захисних властивостей автоматичних вимикачів / О. Г. Середя, І. С. Варшамова, В. В. Литвиненко, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2013. № 15 (988). С. 61-92.

18. Технічний огляд сучасних автоматичних вимикачів низької напруги на номінальний струм 250А / О. Г. Середя, В. В. Литвиненко, І. С. Варшамова, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2013. № 35 (1008). С. 3-23.

19. Повышение уровня пожарной безопасности корабельных систем электроснабжения / А. Г. Середя, И. С. Варшамова, В. В. Литвиненко. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2013. № 65 (1038). С. 37-52.

20. Диагностирование аварийных режимов в разветвленной сети электроснабжения на основе анализа среднеквадратичного значения тока / А. Г. Середя. *Научні известия на НТСМ*. 2013. № 2 (139). С. 414-419.

21. Расширение функциональных возможностей аппаратов релейной защиты на основе анализа действующего значения тока / А. Г. Середя. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. № 3 (23). С. 75-82.

22. Середя А. Г. Дальнее резервирование отказов защит разветвленной сети электроснабжения с учетом пусковых токов асинхронных электродвигателей. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 5 (82). С. 16-21.

23. Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань / О. Г. Середа, О. С. Кобозев. *Електротехнічні системи і комп'ютерні системи*. 2013. № 09 (85). С. 57-64.

24. Покращення захисних властивостей протиаварійної автоматики суднових систем електропостачання / О. Г. Середа, І. С. Варшамова, Н. Г. Фонта. *Вісник Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2014. № 1 : веб-сайт. URL: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/39874>.

25. Sereda Oleksandr G. Identification of starting currents of induction motors in a branched power network and its protection from remote short circuit. *Acta Technica*. 2014. Vol. 59, № 2. С. 135-147.

26. Середа О. Г. Захист розгалуженої мережі електропостачання з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2014. № 785. С. 66-73. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC_2014_785_13.pdf. (дата звернення 01.01.2021).

27. Середа О. Г. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску. *Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету*. 2014. Вип. 2 (43). С. 100-110.

28. Підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок використання комплексних критеріїв спрацьовування захисних апаратів / І. С. Варшамова, О. Г. Середа, Н. Г. Фонта. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2015. № 13 (1122). С. 3-19.

29. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску / О. Г. Середа, А. О. Прохоренко. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 5. С. 69-76.

30. Построение новых защит на основе анализа характера изменения суммарной мгновенной мощности при возмущении электрической цепи / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев, А. Г. Серeda. *Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал*. 2015. № 4. С. 2-4.

31. Серeda О. Г. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 2. С. 90-96.

32. Захист асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму / О. Г. Серeda, І. С. Варшамова. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 3. С. 14-19.

33. Monitoring thermal state of induction motors through the winding direct temperature control during the start / Oleksandr G. Sereda, Victoriia Lytvynenko, Iryna Varshamova. *Acta Technica*. 2018. Vol. 63, iss. 3. P. 433-446.

34. Швидкодіючий автоматичний вимикач постійного струму високої напруги : пат. 88512 Україна : МПК (2009) H01H 71/12. № а 2007 10518 ; заявл. 24.09.2007 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 31.

35. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань : пат. 101084 Україна : МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2011 09057 ; заявл. 19.07.2011 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.

36. Спосіб визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік шляхом множення залежностей струму від часу на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації : пат. 102741 Україна : МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2011 13048 ; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.

37. Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленням вздовж лінії навантаження : пат. 105560 Україна : МПК (2014.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2012 10691 ; заявл. 12.09.2012 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.

38. Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки : пат. 105141 Україна : МПК Н02Н 5/04 (2006.01), Н02Н 7/085 (2006.01). № а 201308219 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

39. Спосіб захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску : пат. 105150 Україна : МПК Н02Н 5/04 (2006.01), Н02Н 7/085 (2006.01). № а 2013 10027 ; заявл. 12.08.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

40. Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження : пат. 106030 Україна : МПК (2014.01) Н02Н 3/08 (2006.01), Н02Н 7/085 (2006.01), Н01Н 73/00. № а 2013 112986 ; заявл. 08.11.2013 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

41. Спосіб захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень : пат. 113596 Україна : МПК (2016.01) Н02Н 3/08 (2006.01), Н02Н 7/00, Н01Н 73/00, Н02Н 7/10 (2006.01), Н02Н 3/16 (2006.01), Н02М 1/32 (2007.01), G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 00564 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

42. Спосіб максимального струмового захисту з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів : пат. 114380 Україна : МПК (2017.01) Н02Н 3/08 (2006.01), Н02Н 7/00, Н01Н 73/02 (2006.01). № а 2016 05401 ; заявл. 18.05.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

43. Спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів : пат. 119874 Україна : МПК (2019.01) Н02Н 3/08 (2006.01), Н02Н 3/13 (2006.01), Н02Н 7/00, Н01Н 73/00, G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 13655 ; заявл. 30.12.2016 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

44. Спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника : пат. 122365 Україна : МПК (2020.01) Н02Н 3/08 (2006.01), Н02Н 7/00, Н01Н 73/00, Н02Н 7/26 (2006.01). № а 2018 12180 ; заявл. 10.12.2018 ; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20.

ABSTRACT

Sereda O.H. Theoretical bases of development of digital technologies in systems of automation, diagnostics, control and protection of electrotechnical complexes. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of the scientific degree of the Doctor of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021.

The Dissertation is devoted to the development of the theory of electromagnetic transients in electrotechnical complexes and low voltage systems with asymmetric modes of operation of power distribution networks, namely the development of a theoretically sound system of scientific methods and research approaches to digital technologies application to improve the protective characteristics of relay protection devices and emergency automation of electrical networks with voltage of 0.4 kV.

Expediency of decomposition of signals representing complex oscillations into harmonic components by their discretization by multiplication by a lattice delta function with frequency less than twice the Nyquist frequency is theoretically substantiated and proved, which made it possible to expand the list of diagnosed emergency modes of distribution networks with voltage of 0.4 kV of trunk configuration.

The theory of digital processing of analog signals by multiplying them by lattice delta functions with different discretization intervals is further developed, which allowed to accelerate the analysis of the harmonic spectrum of phase currents and currents in a neutral conductor in the presence of nonlinear distortions of their sinusoidal shape due to different load characteristics.

The expediency of application of methods of digital processing of signals received from current sensors for formation of complex criteria of operation of the maximum current protections at interphase short circuits for the purpose of identification of emergency modes of operation of an electric network on degree of distortions of average square phase current values during transient mode is

theoretically substantiated which allowed to reduce the sensitivity threshold of the maximum current protection to the level of currents of short circuits, the values of which are less than the starting currents of induction motors connected at the beginning of the power line.

Procedures for digital processing of signals received from current sensors are established in order to extract information about such parameters of electric circuit as power factor and harmonic spectrum of phase currents, based on analysis of distorted under the influence of nonlinear loads and aperiodic component of rms values calculated in transient mode which does not exceed one period of change of phase electromotive force.

Expediency of formation of criterion of operation of protection of neutral conductor against overload currents and currents of single-phase short circuits without involvement of harmonic analysis of spectrum of non-sinusoidal current, when purposeful distortion of rms value by selecting the appropriate discretization frequency of the output analog dependence allows not to take into account the value of the current of the third harmonic when constructing protection against single-phase short circuits and to take into account when constructing overcurrent protection. Is scientifically substantiated and proved.

Taking into account the development of the existing methodology in the field of digital signal processing theory, a set of scientific methods and research approaches to solving the topical scientific and applied problem of improving the protective characteristics of maximum current protection devices is developed, namely:

- methods for determining the power factor of an electric circuit in the transient mode of overcurrent occurrence for the formation of a complex criterion for identifying the type of perturbation: remote short-circuit current or starting current of an induction motor;
- a method of analysis of the harmonic composition of phase currents of non-sinusoidal shape for rapid identification of emergency modes of operation of power distribution networks in the presence of nonlinear loads;

- a method of sliding monitoring of the rms value of current by applying a mathematical apparatus for integrating the squares of its instantaneous values obtained with determined discretization frequency of the output analog current dependence in time, which allowed: to diagnose the violation of integrity of the neutral conductor at any place of the branch power transmission network with both linear and nonlinear loads without involving harmonic analysis of the phase current spectrum and to form criteria for operation of devices for protection of single-phase electricity consumers from overvoltages caused by a break in a neutral conductor; to improve the algorithm of protection of neutral conductor from overload currents and currents of single-phase short circuits by taking into account the harmonic current spectrum in the neutral conductor, which allowed in power supply networks with different load characteristics to take into account the third harmonic component of current selectively by selecting the appropriate discretization frequency of the input analog time dependence;
- methods for diagnosing the thermal state of induction motors operating in repeated short-term operation mode by direct control of the temperature of the stator windings at start-up, based on the analysis of the effect of changes in active resistance of the stator winding when changing its temperature on the non-uniform extreme values of instantaneous power consumption of the electric motor at start-up;
- a method of thermal protection of induction motors at nonlinear distortions of sinusoidal shape of phase currents, which reduces the reduction of the sensitivity threshold of thermal protection of induction motors at overload currents by taking into account the influence of higher harmonic components in phase currents, namely the current of the fifth harmonic leading to additional losses and heating of the stator windings.

Algorithms for digital processing of analog signals received from current sensors to ensure the operation of microcontroller control units for relay protection devices and emergency automation are developed, namely:

- algorithms for rapid identification of the type of overcurrent, in particular starting currents of induction motors, for a time not exceeding one period of change of phase electromotive force after arising of perturbation of the electric circuit, which reduced the sensitivity threshold of maximum current protection devices to the level of currents of remote short-circuits and to provide the mode of remote redundancy of failures of protections;
- algorithms of circuit breakers microcontroller releases operation in case of neutral conductor break in any place of branched network with load distributed along the power line, in which in the presence of nonlinear loads the formation of protection criterion is carried out due to widely used in relay protection and emergency automation devices mathematical operations of integration of squares of instantaneous values of phase currents without involvement of the analysis of their harmonic structure;
- an algorithm of circuit breakers microcontroller releases operation in protection of neutral conductor from overload currents and single-phase short-circuit currents, which is based on sliding monitoring of rms value of current in neutral conductor in mode when purposefully distortions are introduced in calculating the rms value of the current by selecting the appropriate discretization frequency of the input analog dependence which allowed not to take into account the value of the current of the third harmonic in the construction of protection against single-phase short circuits and to take into account at the implementation of overload protection to ensure full selectivity of protection of distribution networks of 0.4 kV with deaf neutral grounding with both linear and nonlinear loads without the involvement of harmonic analysis of the current spectrum in a neutral conductor;
- algorithms for diagnosing the thermal state of induction electric motors in the transient start-up mode by directly controlling the temperature of the stator winding by changing its active resistance when heated, the essence of which is to analyze the non-uniformity of extreme values of instantaneous and quasi-instantaneous power consumption in the mode of occurrence of starting current;

- an algorithm of operation of the relay of thermal protection of induction motors taking into account the higher harmonic components in phase currents, namely the current of the fifth harmonic, which leads to additional losses and heating of the stator windings.

The Introduction substantiates the relevance of the Dissertation topic and the chosen direction of research, formulates the main purpose and objectives of the work, presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained.

The first section presents the scientific and technical substantiation of urgency of carrying out of researches and development of methods of formation of optimum algorithms of functioning of microcontroller means of emergency control for the purpose of maintenance of stability of electric power complexes and systems.

The first section analyzes the technical solutions aimed at the rapid formation of criteria for identifying different emergency modes of electric circuit operation: interphase short circuits, starts of induction motors, single-phase short circuits on the neutral conductor, overvoltages in single-phase power consumers due to violation of the integrity of the neutral conductor, overloads of the neutral conductor with currents of the third harmonic, diagnosing the thermal state of induction motors during overloads.

The second section develops effective algorithms for rapid identification of overcurrent type with high sensitivity to remote short-circuit currents, which allowed to improve the protective time-current characteristics of circuit breakers microcontroller releases and provide both high-speed selective protection and remote backup mode of failures of devices of the maximum current protection.

In the third section, mathematical relations are obtained that allow in power supply networks with nonlinear types of loads and, as a consequence, with distortion of sinusoidal shape of phase currents to take into account their harmonic composition when constructing highly sensitive protections of four-wire branched power supply networks with the load distributed along the main power line in emergency modes of operation of the neutral conductor.

The fourth section theoretically substantiates a method of diagnosing emergency modes of an electric circuit, which consists in analyzing the non-uniformity of extreme values of instantaneous power consumed in the transient mode of perturbation current occurrence, namely, mathematical models of thermal state of electric motors operating in repeated short-term mode when protecting against unacceptable excess of temperature of the windings by direct control of the temperature of the stator winding by increasing its active resistance are developed. A technical solution is proposed and implemented in the form of an algorithm for the operation of a microprocessor protection device, which allows in the mode of sliding monitoring to generate the operation time of protection relay of induction motors against overload currents taking into account nonlinear distortions of phase currents.

Key words: power supply distribution network, relay protection, maximum current protection, digital signal processing, power factor, remote short circuit, remote redundancy of protection failures, nonlinear distortions, harmonic spectrum of non-sinusoidal signal, induction electric motor, rms current value, analog signal discretization, discretization frequency, quantization interval, microcontroller control unit, circuit breaker, semiconductor release.

Publications list of the applicant on the dissertation topic:

1. Bystrodejstvujushhaja sistema zashhity moshhnyh tiristornyh preobrazovatelej na osnove tokoogranichivajushhih avtomaticheskikh vykljuchatelej / A. Ju. Baru, V. P. Bogatyrev, Ju. L. Shindnes, A. G. Sereda. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2002. № 2. S. 15-17.

2. Sereda A. G. Jeffektivnoe ispol'zovanie nezavisimyh rascepitelej tokoogranichivajushhih avtomaticheskikh vykljuchatelej. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2004. № 3. S. 56-60.

3. Sposobnost' metallokeramicheskikh kontaktov tokoogranichivajushhih avtomaticheskikh vykljuchatelej kommutirovat' predel'nye toki korotkogo zamykanija / A. G. Sereda. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2005. № 3. S. 45-47.

4. Povyshenie jelektricheskoi izoljatsii mezhkontaktnogo promezhnutka v bystrodejstvujushhem avtomaticheskom vykljuchatele postojannogo toka / V. V. Litvinenko, V. S. Lupikov, A. G. Sereda. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2006. № 36. S. 65-68.

5. Raschet poljarizovannoi magnitnoi cepi vyhodnogo rele dlja poluprovodnikovogo rascepitelja avtomaticheskogo vykljuchatelja / A. G. Sereda, E. V. Fetjuhina. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2006. № 3. S. 35-38.

6. Uovershenstvovannaja matematicheskaja model' indukcionno-dinamicheskogo privoda avtomaticheskogo vykljuchatelja / V. V. Litvinenko, V. S. Lupikov, A. G. Sereda. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2008. № 40. S. 66-83.

7. Bystrodejstvujushhij avtomaticheskij vykljuchatel' postojannogo toka vysokogo naprjazhenija / V. S. Lupikov, A. G. Sereda, V. V. Litvinenko. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2008. № 1. S. 25-29.

8. Jefferektivnoe ispol'zovanie jelektrodinamicheskikh usilij v kontaktnykh sistemah avtomaticheskikh vykljuchatelej / D. K. Monahov, O. G. Sereda. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2009. № 44. S. 87-94.

9. Kachestvennyj analiz vlijanija ferromagnitnogo serdechnika na velichinu sily indukcionno-dinamicheskogo privoda / V. V. Litvinenko, V. S. Lupikov, A. G. Sereda. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2010. № 29. S. 57-64.

10. Jeksperimental'nye issledovanija bloka kompensacija peremennogo magnitnogo polja dlja avtomaticheskogo vykljuchatelja / E. G. Korol', V. S. Lupikov, A. G. Sereda, Ju. D. Rudas. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» : zb. naukovykh prats. Tematychnyi vypusk : Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2011. № 4. S. 20-28.

11. Kompensacija vektora peremennogo magnitnogo momenta jelektrooborudovanija s pomoshh'ju jelektromagnita s sostavnym ferromagnitnym serdechnikom / E. G. Korol', V. S. Lupikov, A. G. Sereda, Ju. D. Rudas. Tekhnichna elektrodynamika. 2011. № 4. S. 20-25.

12. Teplovyi rozrakhunok strumoveduchoi chastyny avtomatichnoho vymykacha / V. V. Litvinenko, A. G. Sereda, L. S. Kozar, V. V. Morgun. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2012. № 28. S. 27-43.

13. Modernizacija zashhity jelektrostanovok sobstvennykh nuzhd AJeS naprjazheniem 0,4 kV / A. S. Kobozev, A. G. Sereda, L. B. Zhornjak, V. V. Morgun. Elektrotehnika ta elektroenerhetyka. 2012. № 2. S. 66-72.

14. Povyshenie nadezhnosti zashhity jelektricheskikh setej OBLJeNERGO 0,4 kV za schet ispol'zovanija kompleksnykh kriteriev srabatyvanija / A. S. Kobozev, A. G. Sereda. Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka. 2012. № 2 (30). S. 42-54.

15. Vyznachennia diiuchykh znachen periodychnoho nesynusoidalnoho strumu i yoho neparnykh harmonik za dyskretnymy znachenniamy bezperervnoi zalezhnosti strumu u chasi / O. S. Koboziev, O. H. Sereda, V. V. Morhun. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2012. № 5. C. 21-26.

16. Povyshenie pozharnoj bezopasnosti jelektrostanovok sobstvennykh nuzhd naprjazheniem 0,4 kV atomnykh jelektrostanovok / A. G. Sereda, N. G. Fonta, V. V. Morgun, S. A. Berezanskij. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2012. № 61 (967). S. 8-23.

17. Tekhnichniy analiz suchasnykh metodiv pokrashchennia zakhysnykh vlastyvoستي avtomatichnykh vymykachiv / O. H. Sereda, I. S. Varshamova, V. V. Lytvynenko, V. V. Morhun. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2013. № 15 (988). S. 61-92.

18. Tekhnichniy ohliad suchasnykh avtomatychnykh vymykachiv nyzkoi napruhy na nominalnyi strum 250A / O. H. Sereda, V. V. Lytvynenko, I. S. Varshamova, V. V. Morhun. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2013. № 35 (1008). S. 3-23.
19. Povyshenie urovnja pozharnoy bezopasnosti korabel'nyh sistem jelektrosnabzhenija / A. G. Sereda, I. S. Varshamova, V. V. Litvinenko. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2013. № 65 (1038). S. 37-52.
20. Diagnostirovanie avarijnykh rezhimov v razvetvlennoj seti jelektrosnabzhenija na osnove analiza srednekvadratichnogo znachenija toka / A. G. Sereda. Nauchni izvestija na NTSM. 2013. № 2 (139). S. 414-419.
21. Rasshirenie funkcional'nykh vozmozhnostej apparatov relejnoj zashhity na osnove analiza dejstvujushhego znachenija toka / A. G. Sereda. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. 2013. № 3 (23). S. 75-82.
22. Sereda A. G. Dal'nee rezervirovanie otkazov zashhit razvetvlennoj seti jelektrosnabzhenija s uchetom puskovykh tokov asinhronnykh jelektrodivigatelej. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. 2013. № 5 (82). S. 16-21.
23. Pidvyshchennia chutlyvosti maksimalnoho strumovoho zakhystu do strumiv viddalenykh korotkykh zamykan / O. H. Sereda, O. S. Koboziev. Jelektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy. 2013. № 09 (85). S. 57-64.
24. Pokrashchennia zakhysnykh vlastyivostei protyavariinoi avtomatyky sudnovykh system elektropostachannia / O. H. Sereda, I. S. Varshamova, N. H. Fonta. Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova. 2014. № 1 : veb-sait. URL: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/39874>.
25. Sereda Oleksandr G. Identification of starting currents of induction motors in a branched power network and its protection from remote short circuit. *Acta Technica*. 2014. Vol. 59, № 2. C. 135-147.

26. Sereda O. H. Zakhyst rozghaluzhenoi merezhi elektropostachannia z rozpodilnym navantazhenniam vid obryvu neitralnogo providnyka. Visnyk Natsionalnogo universytetu «Lvivska politehnika». Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy. 2014. № 785. S. 66-73. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC_2014_785_13.pdf. (data zvernennia 01.01.2021).

27. Sereda O. H. Zakhyst asynkhronnykh elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia z bezposerednim kontrolem temperatury obmotky v moment pusku. Zbirnyk naukovykh prats Donbaskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. 2014. Vyp. 2 (43). S. 100-110.

28. Pidvyschennia nadiinosti zakhystu elektrychnykh merezh pobutovoho pryznachennia za rakhunok vykorystannia kompleksnykh kryteriiv spratsovuvannia zakhysnykh aparativ / I. S. Varshamova, O. H. Sereda, N. H. Fonta. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» : zb. naukovykh prats. Tematychnyi vypusk : Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2015. № 13 (1122). S. 3-19.

29. Zakhyst asynkhronnykh elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia z bezposerednim kontrolem temperatury obmotky v moment pusku / O. H. Sereda, A. O. Prokhorenko. Naukovyi visnyk Natsionalnogo hirnychoho universytetu. 2015. № 5. S. 69-76.

30. Postroenie novykh zashhit na osnove analiza haraktera izmenenija summarnoj mgnovennoj moshhnosti pri vozmushhenii jelektricheskoi cepi / V. E. Rajnin, A. S. Kobozev, A. G. Sereda. Jeletrotehnika: Ezhemesjachnyj nauchno-tehn. zhurnal. 2015. № 4. S. 2-4.

31. Sereda O. H. Zakhyst asynkhronnykh elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia z urakhuvanniam neliniinykh spotvoren faznykh strumiv. Naukovyi visnyk Natsionalnogo hirnychoho universytetu. 2015. № 2. S. 90-96.

32. Zakhyst asynkhronnykh elektrodvyhuniv pobutovykh pryladiv vid strumiv perevantazhennia z urakhuvanniam neliniinykh spotvoren faznogo strumu / O. H. Sereda, I. S. Varshamova. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015. № 3. S. 14-19.

33. Monitoring thermal state of induction motors through the winding direct temperature control during the start / Oleksandr G. Sereda, Victoriia Lytvynenko, Iryna Varshamova. *Acta Technica*. 2018. Vol. 63, iss. 3. P. 433-446.

34. Shvydkodiiuchy i avtomatychnyi vymykh postiiinoho strumu vysokoi napruhy : pat. 88512 Ukraina : MPK (2009) N01N 71/12. № a 2007 10518 ; zaiavl. 24.09.2007 ; opubl. 26.10.2009, Biul. № 31.

35. Sposib shvydkodiiuchoho maksimalnogo strumovoho zakhystu z vysokoju chutlyvistiu do strumiv viddalenykh korotkykh zamykan : pat. 101084 Ukraina : MPK (2013.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00. № a 2011 09057 ; zaiavl. 19.07.2011 ; opubl. 25.02.2013, Biul. № 4.

36. Sposib vyznachennia diiuchykh znachen periodychnoho nesynusoidalnogo strumu i yoho neparnykh harmonik shliakhom mnozhennia zalezhnosti strumu vid chasu na hratchastu delta-funktsiiu z riznymy intervalamy dyskretyzatsii : pat. 102741 Ukraina : MPK (2013.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00. № a 2011 13048 ; zaiavl. 07.11.2011 ; opubl. 12.08.2013, Biul. № 15.

37. Sposib zakhystu vid obryvu neitralnogo providnyka v bud-yakomu mistsi elektrychnoi merezhi z rozpodilnym vzdovzh linii navantazhenniam : pat. 105560 Ukraina : MPK (2014.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00. № a 2012 10691 ; zaiavl. 12.09.2012 ; opubl. 26.05.2014, Biul. № 10.

38. Sposib zakhystu elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia z bezposerednim kontrolem temperatury obmotky : pat. 105141 Ukraina : MPK N02N 5/04 (2006.01), N02N 7/085 (2006.01). № a 201308219 ; zaiavl. 01.07.2013 ; opubl. 10.04.2014, Biul. № 7.

39. Sposib zakhystu asynkhronnykh elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia z bezposerednim kontrolem temperatury obmotky v moment pusku : pat. 105150 Ukraina : MPK N02N 5/04 (2006.01), N02N 7/085 (2006.01). № a 2013 10027 ; zaiavl. 12.08.2013 ; opubl. 10.04.2014, Biul. № 7.

40. Sposib zakhystu elektrodvyhuniv vid strumiv perevantazhennia : pat. 106030 Ukraina : MPK (2014.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/085 (2006.01), N01N 73/00. № a 2013 112986 ; zaiavl. 08.11.2013 ; opubl. 10.07.2014, Biul. № 13.

41. Sposib zakhystu neitralnoho providnyka vid strumiv perevantazhennia ta strumiv odnofaznykh korotkykh zamykan v elektrychnykh merezhakh z neliniinymy vydamy navantazhen : pat. 113596 Ukraina : MPK (2016.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00, N02N 7/10 (2006.01), N02N 3/16 (2006.01), N02M 1/32 (2007.01), G01R 31/02 (2006.01). № a 2016 00564 ; zaiavl. 25.01.2016 ; opubl. 10.02.2017, Biul. № 3.

42. Sposib maksimalnoho strumovoho zakhystu z vybirkovoiu chutlyvistiou do strumiv viddalenykh korotkykh zamykan ta puskovykh strumiv asynkhronnykh elektrovyhuniv : pat. 114380 Ukraina : MPK (2017.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/02 (2006.01). № a 2016 05401 ; zaiavl. 18.05.2016 ; opubl. 25.05.2017, Biul. № 10.

43. Sposib zakhystu elektrychnoi merezhi z rozpodilenyim navantazhenniam vid obryvu neitralnoho providnyka z urakhuvanniam neliniinykh spotvoren faznykh strumiv : pat. 119874 Ukraina : MPK (2019.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 3/13 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00, G01R 31/02 (2006.01). № a 2016 13655 ; zaiavl. 30.12.2016 ; opubl. 27.08.2019, Biul. № 16.

44. Sposib zakhystu odnofaznykh spozhyvachiv elektroenerhii vid perenapruih, shcho vyklykani obryvom neitralnoho providnyka : pat. 122365 Ukraina : MPK (2020.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00, N02N 7/26 (2006.01). № a 2018 12180 ; zaiavl. 10.12.2018 ; opubl. 26.10.2020, Biul. № 20.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ І СИСТЕМ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ	19
1.1. Проблеми, пов'язані з координацією з надструму апаратів максимального струмового захисту розподільних мереж електропостачання електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ	19
1.2. Необхідність удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики електроустановок власних потреб об'єктів з підвищеним рівнем пожежної безпеки	43
1.3. Необхідність удосконалення захисних характеристик апаратів максимального струмового захисту автономних систем електропостачання	54
1.4. Проблема, пов'язана із забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів релейного захисту розподільних мереж електропостачання промислових підприємств та цивільних споруд напругою 0,4 кВ	58
1.5. Проблема захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом нейтрального провідника в електричних мережах з розподіленням вздовж ЛЕП нелінійним навантаженням	62
1.6. Проблема пов'язана із забезпеченням селективного захисту нейтрального провідника від струмів однофазних коротких замикань та струмів перевантаження	66
1.7. Актуальність проблем, пов'язаних з удосконаленням алгоритмів теплового захисту електромеханічних перетворювачів	71
1.8. Висновки до розділу 1	76

РОЗДІЛ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПРИНЦИПУ КООРДИНАЦІЇ З НАДСТРУМУ АПАРАТІВ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ І СИСТЕМ З ВИБІРКОВОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ	78
2.1. Дослідження можливості реалізації швидкодіючого інтегрального принципу координації захисних характеристик апаратів максимального струмового захисту електричних мереж напругою 0,4 кВ	78
2.2. Визначення середньоквадратичного значення симетричної складової струму короткого замикання в перехідному режимі виникнення збурення електричного кола	81
2.3. Спосіб максимального струмового захисту розгалужених електричних кіл з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів	90
2.4. Метод формування комплексного критерію спрацьовування апаратів максимального струмового захисту при міжфазних коротких замиканнях	103
2.5. Ідентифікація пускових струмів асинхронних електродвигунів при захисті розподільної мережі електропостачання від струмів віддалених симетричних коротких замикань	107
2.6. Віддалене резервування відмов апаратів максимального струмового захисту розподільних мереж електропостачання низької напруги з урахуванням пускових струмів асинхронних електродвигунів	122
2.7. Практична реалізація алгоритмів зниження порогу чутливості апаратів максимального струмового захисту до рівня струмів віддалених коротких замикань	143
2.8. Висновки до розділу 2	156

РОЗДІЛ 3. ЗАХИСТ РОЗГАЛУЖЕНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З РОЗПОДІЛЕНИМ ВЗДОВЖ МАГІСТРАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАВАНТАЖЕННЯМ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА	158
3.1. Метод визначення середньоквадратичних значень періодичного несинусоїдального струму та його непарних гармонійних складових за дискретними значеннями безперервної залежності в часі	158
3.2. Метод формування комплексного критерію спрацьовування захисту розгалужених мереж електропостачання з розподіленням вздовж лінії електропередачі навантаженням при обриві нейтрального провідника	179
3.3. Врахування нелінійних спотворень фазних струмів для захисту розгалужених мереж електропостачання з розподіленням вздовж лінії електропередачі навантаженням при обриві нейтрального провідника	201
3.4. Захист однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом нейтрального провідника в чотирьохпровідних розгалужених мережах електропостачання з розподіленням вздовж лінії електропередачі несиметричним нелінійним навантаженням	214
3.5. Захист нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в чотирьохпровідних розгалужених мережах електропостачання напругою 0,4 кВ з розподіленням вздовж лінії електропередачі несиметричним нелінійним навантаженням	227
3.6. Висновки до розділу 3	237

РОЗДІЛ 4. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ АПАРАТАМИ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	238
4.1. Удосконалення захисних властивостей апаратів теплового захисту асинхронних електродвигунів шляхом реалізації функції безпосереднього контролю над температурою обмотки статора в момент пуску	238
4.2. Прискорене діагностування теплового стану обмоток статора асинхронних електродвигунів зі швидким стартом шляхом безпосереднього контролю над температурою обмотки статора в момент пуску	247
4.3. Підвищення чутливості апаратів теплового захисту трифазних асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження шляхом урахування нелінійних спотворень фазних струмів	263
4.4. Висновки до розділу 5	277
ВИСНОВКИ	278
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	283
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи	305
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації	314